

تأثیر فاصله توقف در شکل و ریزساختار فصل مشترک جوشکاری انفجاری اتصال سه گانه ورق‌های برنج Ms90 / فولاد St14 / برنج Ms90

البرز فتحی یونسی* و سیدعلی اصغر اکبری موسوی

دانشگاه تهران، دانشکده فنی، گروه مهندسی مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۲/۲۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۷/۷/۱۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۷/۱۰/۵

چکیده در این مقاله، اتصال سه لایه برنج MS90 / فولاد ST14 / برنج MS90 به صورت آرایش موازی و در فواصل توقف متفاوت، و با نسبت بار انفجاری ثابت، مطابق پارامترهای اتخاذ شده در محدوده پنجره جوشکاری انفجاری مربوط به دو فلز، بررسی شده است. ریزساختار متالورژیکی محل اتصال، با میکروسکوپ‌های نوری و روبشی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله توقف، فصل مشترک از حالت صاف به حالت موجی تبدیل می‌شود. همچنین، با افزایش فاصله توقف، دامنه و طول موج در فصل مشترک افزایش می‌یابد. با بررسی ترکیبات احتمالی موجود در فصل مشترک، مشاهده شد که در لایه حاصل از سیلان پلاستیک، هیچ‌گونه ترکیب بین فلزی ایجاد نشده است.

کلمات کلیدی جوشکاری انفجاری، فصل مشترک، فولاد St14، برنج Ms90، فاصله توقف.

Effect of Stand-Off Distance on the Shape and Microstructure of the Interface of Three-Layer Explosive Welding Of Ms90 Brass / St14 Steel/Ms90 Brass

A. Fathi Younesi and S.A. Akbari Mousavi

Group of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran

Abstract In this study, the effect of stand-off distance on the shape and microstructure of the interface of Ms90 brass / St14 steel / Ms90 brass was been investigated using the constant explosive charge and according to the welding window of both metals. The welding tests were carried out in parallel set-up geometry. The microstructural and metallurgical studies were carried out with optical and scanning electron microscope (SEM). Results show that the shape of the interface changes from smooth to wavy interface with the stand-off distance. Moreover, the wavelength and amplitude sizes are increased with the stand-off distance. By considering the probable phase composition at the interface, the EDS analysis shows the presence of no intermetallic component in the plastic zone in any interfaces.

Key words Explosive welding, Interface, St14 Steel, Ms 90 Brass, Stand-Off Distance.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده فنی، گروه مهندسی مواد.

تلفن: ۰۹۱۲۷۱۲۲۷۶۰، دورنگار: ۰۲۱-۸۸۰۰۶۰۷۶، پیام نگار: Alborz.Fathi@gmail.com

۱- مقدمه

جوشکاری این دو نوع آلیاژ، با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری، فصل مشترک از حالت صاف به موجی تبدیل شد.

با افزایش فاصله توقف، دامنه و طول موج فصل مشترک، افزایش یافته است. همچنین بررسی های سختی سنجی نشان داد که در مرز اتصال، سختی به طور محسوسی افزایش یافته است. آنها نتیجه گرفتند که علاوه بر ایجاد شوک مکانیکی در سطوح، به سبب کار مکانیکی شدیدی که هنگام جوشکاری در فلزات رخ می دهد، مقدار سختی در محل برخورد صفحه پایه و صفحه پرده، افزایش خواهد یافت. در تحقیقات دیگری که برای اتصال مس به سایر آلیاژها نیز انجام شده است، افزایش طول موج و دامنه امواج بر اثر افزایش نسبت انفجار و افزایش انرژی ضربه ای ذکر شده است [۸،۷]. Kahraman و همکارانش [۸]، همچنین گزارش کرده اند که در اثر تغییر فرم شدید در منطقه فصل مشترک، دانه های مسی ریز می شوند و با افزایش بار انفجاری نیز، اندازه دانه ها، کاهش می یابد.

Raghukanda [۹] مطالعاتی بر روی جوشکاری انفجاری مس به فولاد ساده کربنی انجام داد. او به بررسی باندهای برشی آدیباتیک و دوقلویی های مکانیکی، در درون دانه های مس پرداخته است که به دلیل تنش برشی شدید در منطقه فصل مشترک ایجاد می شود.

از عوامل مهم ایجاد اتصال مناسب، صافی سطح است. صافی سطح در حد دو مثلث، برای انجام جوش موفق لازم است؛ هرچند معمولاً "صافی سطح در حد سه مثلث را برای جوشکاری انفجاری پیشنهاد میکنند [۱۰]". اما اثر صافی سطح چنان نیست که به آزمایش اندازه گیری ناهمواری سطح به روش ITO یا تعیین مورفولوژی سطح با میکروسکوپ الکترونی نیاز باشد [۱،۲،۱۰].

در این مقاله، اتصال سه لایه آلیاژ برنج و فولاد کم کربن پرداخته شده است. کاربرد این اتصال در صنایع نظامی است. برنج MS90 استحکام کمتری نسبت به برنج ۴۰/۶۰ دارد؛ ولی

جوشکاری انفجاری یکی از انواع فرآیندهای جوشکاری حالت جامد است که در اثر برخورد مایل دو فلز با سرعت زیاد و در شرایط کنترل شده، اتصال صورت می گیرد. در این روش، از مواد منفجره به منزله منبع تولید انرژی برخورد استفاده می شود. باتوجه به اینکه برخورد (که به صورت مورب است) در فشار بسیار بالا و در کسری از ثانیه انجام می شود، انتظار می رود سطوح دو فلز هنگام تماس با یکدیگر، رفتار هیدرودینامیکی داشته باشند [۱،۲]. پدید آمدن سیال در هنگام جوشکاری، باعث می شود که جلوی جبهه انفجار در شرایط خاص، یک جت پلاسمایی تشکیل شود. این جت پلاسمایی باعث می شود لایه های اتمی سطحی از موضع اتصال جدا شوند و سطح بسیار تمیز و آلودگی سطحی و اکسید، برای جوشکاری آماده شود. این سطوح بدون اکسید، در اثر نیروی انفجار به هم فشرده می شوند و اتصال متالورژیکی با تشکیل پیوندهای اتمی حاصل خواهد شد [۳،۱،۲]. باتوجه به زمان بسیار کم عملیات، گرمای انفجار بر روی فصل مشترک تأثیری ندارد و اتصال کاملاً در حالت جامد انجام خواهد شد.

هدایت حرارتی بالای مس و آلیاژهایش باعث شده است اتصالات پایه مس از طریق روش های ذوبی به سختی انجام شود. فرآیندهای جوشکاری حالت جامد، راه حل منطقی برای این گونه اتصالات هستند. در مورد جوشکاری انفجاری آلیاژهای مس به آلیاژهای آهنی، تحقیقات محدودی صورت گرفته است. باتوجه به اینکه اتصال مس به فولادهای زنگ نزن به طور گسترده در بدنه راکتورهای هسته ای کاربرد دارند، بیشتر تحقیقات، بر روی فولادهای زنگ نزن، انجام گرفته است [۴،۵،۶].

Durgutlu و همکارانش [۵،۶]، با تغییر پارامترهای جوشکاری، فولاد زنگ نزن را به مس خالص اتصال دادند. در

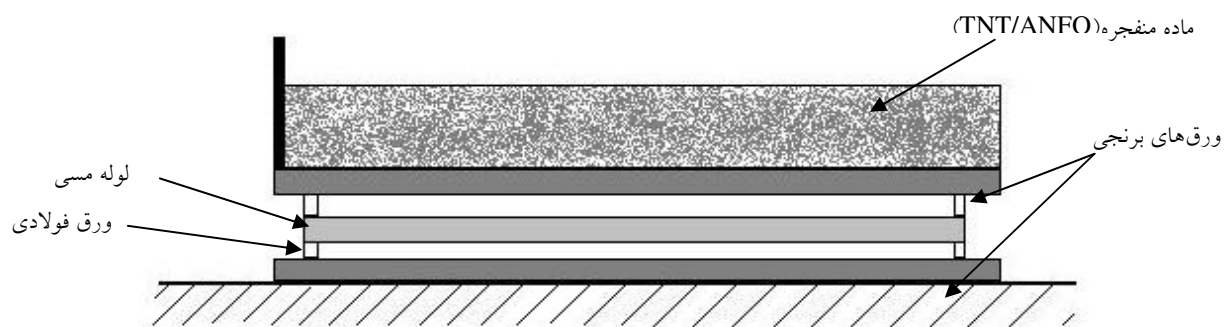
مقدار انعطاف پذیری آن بیشتر از برنج ۴۰/۶۰ است. این محصول بعد از جوشکاری انفجاری، باید تحت تغییر فرم بیشتری در فرآیند شکل دهی بعدی قرار گیرد. لذا از برنج MS90 و فولاد ST14، که هر دو چقرمگی بالا و استحکام مناسب دارند استفاده می شود.

باتوجه به تحقیقات قبلی، بررسی جوشکاری انفجاری سه لایه این دو آلیاژ برای اولین بار صورت گرفته است. این مقاله به تأثیرات پارامتر فاصله توقف بر خواص متالورژیکی فصل مشترک می پردازد. این اتصال، در محیط خورنده و نیتروژنی قرار نمی گیرد؛ بنابراین خوردگی گالوانیکی و خوردگی تنشی، موضوع مورد پژوهش نیست.

مخلوط ۹۵/۵ درصد ماده منفجره TNT/ANFO برای انفجار انتخاب شد. دانسیته این ماده منفجره ۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، سرعت انفجار این مخلوط (VD) برابر با ۲۸۰۰ متر بر ثانیه است. با استفاده از پنجره جوشکاری مربوط به فولاد و مس، ضخامت ماده منفجره ۲۰ میلیمتر برای ایجاد اتصال انتخاب شد. باتوجه به سرعت نسبتاً پایین انفجار در فرآیندهای جوشکاری انفجاری، یک چاشنی برای شروع انفجار لازم است که در اینجا از بوستر شارژ (Booster Charge) C4 استفاده شد. چهار نمونه با تغییر فاصله های

۲- نحوه انجام آزمایش

ابتدا نمونه هایی از ورق های برنجی و فولادی به ابعاد



شکل ۱. چیدمان اولیه صفحات قبل از انفجار.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ورق های مورد استفاده.

Pb	Zn	Cu	Fe	P	S	Mn	C	
-	-	-	بقیه	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۴	۰/۰۸	ورق فولادی St14
ناچیز	۱۰	۹۰	-	-	-	-	-	ورق های برنجی Ms90

جدول ۲. شرایط جوشکاری نمونه‌ها.

شماره نمونه	ضخامت ماده متفجره (mm)	فاصله توقف بالا (mm)	فاصله توقف پایین (mm)	بار انفجاری (R)
۱	۲۰	۱	۱	۱/۰۲۲
۲	۲۰	۱	۱/۵	۱/۰۲۲
۳	۲۰	۱/۵	۱	۱/۰۲۲
۴	۲۰	۱/۵	۱/۵	۱/۰۲۲

توقف جوش داده شد. این متغیرها در جدول ۲ خلاصه شده اند.

سپس سطح مقطع نمونه‌ها، تحت آزمایشات متالوگرافی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا تا سنباده شماره ۲۵۰۰ سنباده زنی شد و سپس با خمیر الماسه ۱ میکرون پولیش شد. عملیات اچ کردن در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، برای حکاکی قسمت فولادی از محلول نایتال ۲٪ و در مرحله دوم، برای اچ کردن قسمت برنجی از محلول آمونیاک و آب اکسیژنه به نسبت ۲ به ۱ استفاده شد.

در نمونه شماره ۴ که بیشترین فواصل توقف انتخاب شده است، تشکیل تغییرات فازی، محتمل تر است؛ لذا این نمونه برای شناسایی فاز ثانویه احتمالی در فصل مشترک و تشخیص ترکیب آن، با دو روش متفاوت، استفاده شد. ابتدا فصل مشترک بالا و پایین نمونه ۴، با میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری EDS، آزمایش شد و سپس پروفیل سختی این نمونه در طول مقطع عرضی بررسی شد.

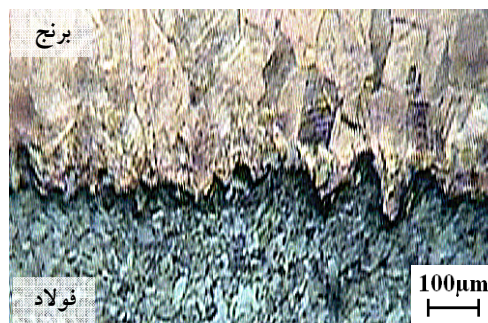
۳. نتایج و بحث

شکل ۲ (سمت راست)، تصاویر متالوگرافی فصل

مشترک بالا و در سمت چپ، تصاویر متالوگرافی فصل مشترک پایین نمونه‌های کامپوزیت سه لایه ۱ تا ۴ (جدول شماره ۲) را نشان می‌دهد. در هر نمونه، طول موج و دامنه امواج اندازه گیری شده که جدول شماره ۳ آمده است. فاصله توقف برای سرعت گرفتن صفحه پرنده و رسیدن به سرعت برخورد مناسب، لازم است. با انجام آزمایش‌های مافوق صوت در همه نمونه‌ها مشاهده شد که اتصال کامل و بدون حفره یا ترک انجام شده است. پس فاصله توقف در محدوده مناسب اتصال وجود داشته است.

در حین فرآیند جوشکاری انفجاری، یک لایه وجود خواهد داشت که تغییر فرم شدید یافته است و علت آن اعمال نیروی انفجاری بسیار شدید در زمان بسیار کم در محل برخورد، در منطقه خیلی نزدیک به فصل مشترک دو فلز است. در این لایه، دانه‌ها تغییر فرم بسیار شدیدی می‌یابند که در تصاویر متالوگرافی، آشکارا نشان داده شده است؛ به طوری که دانه‌ها در امتداد جهت انفجار کشیده می‌شوند [۸،۷،۶،۵]. در همه تصاویر (به ویژه تصاویر فصل مشترک بالا) در اطراف فصل مشترک، دانه‌ها در جهت انفجار کشیده شده‌اند. با افزایش انرژی ضربه‌ای، سیلان پلاستیک در اطراف فصل مشترک بیشتر خواهد شد و در نتیجه دانه‌های بیشتری تحت اثر کار سرد قرار می‌گیرند. باتوجه به اینکه در تصاویر فصل مشترک بالا (شکل ۲) نسبت به فصل مشترک پایین (شکل ۲)،

فصل مشترک های بالا



۱



۲

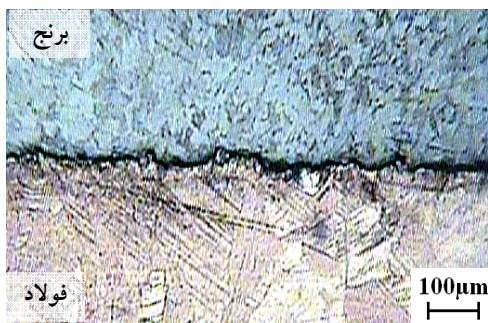


۳



۴

فصل مشترک های پایین



شکل ۲. فصل مشترک های بالا و پایین حاصل از جوش انفجاری در قسمت بالای ساندویچ سه لایه در بزرگنمایی $200\times$ (شماره تصاویر معرف شماره نمونه ها، هستند).

جدول ۳. طول موج و دامنه اندازه‌گیری شده برای نمونه‌های ۱ تا ۴.

فصل مشترک پایین			فصل مشترک بالا			شماره نمونه
دامنه (μm)	طول موج (μm)	فاصله توقف (mm)	دامنه (μm)	طول موج (μm)	فاصله توقف (mm)	
-	-	۱	20 ± 20	100 ± 40	۱	۱
25 ± 15	100 ± 20	۱/۵	50 ± 25	150 ± 35	۱	۲
15 ± 10	95 ± 20	۱	130 ± 20	300 ± 30	۱/۵	۳
40 ± 5	110 ± 30	۱/۵	110 ± 20	260 ± 30	۱/۵	۴

جوشکاری شده است، مانند نمونه قبل در مرز مشترک بالا موج‌هایی دارد.

اما در نمونه‌های ۳ و ۴ به وضوح دامنه و طول موج افزایش یافته است. جدول شماره ۳، این موضوع را به خوبی تأیید می‌کند. همچنین، باتوجه به یکسان بودن تقریبی طول موج و دامنه امواج و شکل‌های میکروسکوپ نوری، این موضوع تأیید می‌شود که شرایط انفجار یکسان بوده است. در جدول شماره ۳، همه طول موج‌ها و دامنه‌ها، آمده است.

در قسمت فصل مشترک‌های پایین، وضعیت کمی پیچیده‌تر است. فصل مشترک‌های بالا، طول موج‌ها و دامنه‌های موج بزرگ‌تری نسبت به فصل مشترک‌های پایین دارند. برای تحلیل این موضوع باید ماهیت ضربه را در نظر گرفت. به طور کلی، شدت ضربه به دو متغیر جرم و سرعت جسم، بستگی دارد. هنگامی که لایه میانی به صورت صفحه پرنده عمل می‌کند، جرم عامل ضربه‌زننده، از جمع دو صفحه پرنده اولیه و ثانویه به دست می‌آید؛ بنابراین انرژی ضربه با فرض سرعت ثابت بسیار بیشتر خواهد شد؛ اما سرعت ثابت نمی‌ماند و کمتر خواهد شد. مهم‌ترین عاملی که باعث می‌شود، انرژی اولیه هنگام رسیدن به صفحه پایه دوم کاهش یابد، به صورت زیر

تغییر فرم بیشتری مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که انرژی ضربه در فصل مشترک بالایی، بیشتر از فصل مشترک پایینی، بوده است.

علاوه بر کشیدگی دانه‌ها در جهت انفجار، پدیده ریزدانه شدن نیز بر اثر کار مکانیکی شدید، در دانه‌های اطراف فصل مشترک رخ داده است [۸]. با افزایش تغییر فرم مکانیکی، اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع با مقایسه تصاویر فصل مشترک بالای ۱ و ۲ با ۳ و ۴ به خوبی نمایان است که در دو تصویر دوم به علت شدت ضربه بیشتر، دانه‌های بسیار ریزتری در قسمت فولادی، دیده می‌شود.

همچنین، باتوجه به وجود تنش برشی شدید در فصل مشترک، احتمال ایجاد باندهای برشی آدیباتیک و دوقلویی‌های مکانیکی، در درون دانه‌های مس وجود دارد. باندهای آدیباتیک برشی در قسمت برنجی تصاویر به خوبی مشخص هستند. این باندها در تحقیقات محققان دیگر هم دیده شده است [۹].

نمونه شماره ۱ در قسمت بالایی فصل مشترکی بین حالت صاف و موجی دارد؛ البته ناهمواری‌هایی در آن دیده می‌شود. نمونه شماره ۲، که با فاصله توقف یک میلی‌متر،

قابل توضیح است:

صفحه میانی به صورت مانعی بر سر راه صفحه پرنده عمل می کند. پس برای حرکت کردن انرژی نسبتاً زیادی نیاز دارد. این انرژی، از انرژی اولیه کسر می شود و فقط مقدار باقیمانده به صفحه دوم می رسد.

بنابراین، این متغیرها وضعیت فصل مشترک پایین را تعیین می کنند. در حالت آزاد (بدون سطوح تکیه گاه زیرین) عامل جرم صفحه نقش اصلی را ایفا می کند زیرا ضریب افزایش شدت ضربه در اثر افزایش جرم، بسیار بیشتر از ضریب کاهش آن، در اثر کاهش سرعت برخورد است. در نتیجه در فصل مشترک پایین، باید انرژی ضربه ای بیشتر باشد.

اما عامل دیگری که از لحاظ عملی بر وضعیت فصل مشترک پایین موثر است، وجود تکیه گاه است. تکیه گاه باعث می شود که مقادیری از انرژی بازگردد و در نتیجه این انرژی و موج انفجار، بسیار کاهش یابد. مقایسه فصل مشترک های بالا و پایین در شکل ۲ نشان می دهد که فصل مشترک های بالا، دامنه و طول موج بیشتری، نسبت به فصل مشترک های پایین دارد. این موضوع در جدول ۳ نیز گزارش شده است.

تصویر فصل مشترک نمونه ۱، کاملاً صاف است. این در حالی است که، بقیه نمونه ها فصل مشترک موجی شکل دارند. با مقایسه طول موج و دامنه دو نمونه ۲ و ۳ مشخص می شود که فصل مشترک این دو نمونه، امواجی با طول موج و دامنه تقریباً مشابه دارند؛ اما نمونه ۳ برخلاف تصور، طول موج و دامنه کمتری دارد. در نمونه ۴، طول موج های به مراتب بلندتری دیده می شود که در جدول ۳ گزارش شده است.

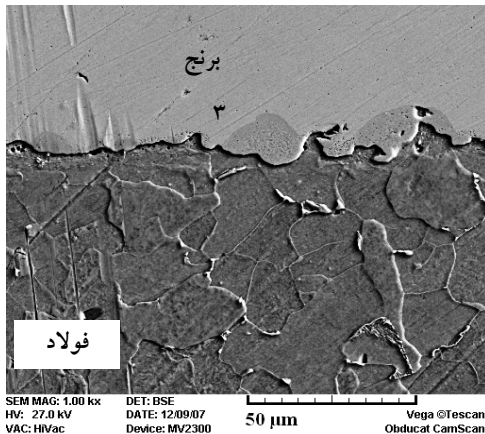
برای بررسی رفتار فصل مشترک پایین، باید گفت که در نمونه ۱، صفحه پرنده اولیه و صفحه پرنده ثانویه، نسبت به بقیه نمونه ها، انرژی کمتری را به صفحات پایه، انتقال داده اند؛ در نتیجه در این فصل مشترک ها نسبت به بقیه، طول موج و دامنه کمتری حاصل می شود و برعکس در نمونه ۴، چون

صفحه پرنده اولیه و صفحه پرنده ثانویه، انرژی بیشتری داشته اند، طول موج و دامنه فصل مشترک آنها بیشتر خواهد بود. هنگام برخورد صفحه پرنده اولیه به صفحه پایه اولیه (صفحه فولادی) در نمونه ۲ نسبت به نمونه ۳، به علت فاصله توقف بیشتر، صفحه فولادی، انرژی بیشتری را برای حرکت دریافت می کند. در مرحله بعد، صفحه پایه اولیه (صفحه فلزی)، تبدیل به صفحه پرنده ثانویه می شود. در این مرحله، صفحه فولادی سرعت و شتاب اولیه ای دارد که از انرژی برخورد مرحله اول به دست آمده است. هرچه این سرعت اولیه و شتاب بیشتر باشد، انرژی ضربه ای که به صفحه پایه نهایی (صفحه برنجی) وارد می کند، بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر، فاصله توقف اولیه، تعیین می کند که چه کسری از انرژی بار انفجاری، به صفحه دوم برسد. البته فاصله توقف ثانویه نیز در تعیین انرژی ضربه ثانویه مؤثر است. اینکه کدام یک از این متغیرها می توانند مؤثرتر عمل کنند، به شرایط آزمایش بستگی دارد.

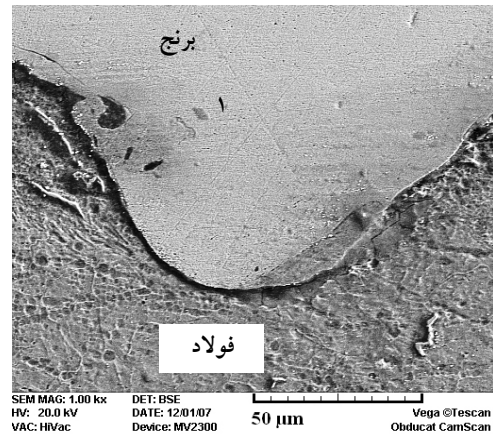
مشکل دیگری که در جوشکاری های انفجاری مطرح می شود، استحاله های فصل مشترک است. انرژی بالای انفجار، یکی از عوامل مهمی است که می تواند باعث انجام واکنش های احتمالی بین دو آلیاژ شود. به علاوه جریان سیلان پلاستیک که هنگام انفجار رخ می دهد، نیز باعث ایجاد یک لایه فصل مشترک می شود، که با افزایش فاصله توقف و سرعت برخورد، ضخامت این لایه افزایش می یابد. به سبب زمان بسیار کم اعمال نیروی انفجاری، گرمای حاصل از انفجار، تأثیر چندانی در ایجاد استحاله های فازی و نفوذ در فصل مشترک ندارد. در اثر برخورد صفحه پرنده و مادر در محل برخورد، به دلیل اعمال شوک حاصل از انفجار، احتمال افزایش دما در منطقه اتصال وجود دارد؛ ولی آزمایش های محققان نشان می دهد که افزایش درجه حرارت، در صورتی که با پارامترهای دقیق جوشکاری انفجاری انجام شود، به حدی نیست که منجر به تغییرات فازی

شناسایی این فاز باید با استفاده از دیاگرام‌های فازی این عناصر انجام شود. گرچه فرآیند جوشکاری انفجاری یک فرآیند غیرتعادلی است؛ می‌توان برای تعیین نوع ترکیبات احتمالی حاصل، به دیاگرام‌های تعادلی استناد کرد. مطابق با آنالیز عنصری EDS، مقدار روی در هر ۴ نقطه کم است و فقط یک فاز ایجاد شده است؛ بنابراین به نظر می‌رسد فاز اصلی ترکیبی از مس و آهن است و روی به صورت عنصر محلول در ترکیب، وجود دارد. مطابق با دیاگرام تعادلی آهن-مس، با حضور مقدار درصد کم روی، هیچ ترکیب بین‌فلزی ایجاد نمی‌شود. می‌توان گفت در فصل مشترک‌های بالا و پایین، به دلیل سیلان پلاستیک بین این دو عنصر برنج و فولاد، مقداری روی

منجر شود. اما در صورتی که مقدار بار انفجاری بسیار زیاد باشد، احتمال تشکیل لایه مذاب در فصل مشترک وجود دارد و در این صورت، جوش ذوبی خواهیم داشت و نه جوش حالت جامد. با افزایش دما، احتمال ایجاد شرایط دیفوزیونی بیشتر است. ولی در فرآیند جوشکاری انفجاری که یک فرآیند حالت جامد است، افزایش دما به حدی نیست که پدیده دیفوزیون را فعال کند [۳، ۱، ۲]. برای شناسایی فاز ثانویه احتمالی و تشخیص ترکیب آن از دو روش آنالیز عنصری EDS و آزمایش میکروسختی سنجی استفاده شده است. در شکل ۳ فصل مشترک بالا و پایین نمونه ۴ در بزرگنمایی بالاتر با میکروسکوپ الکترونی روبشی، آزمایش شده است.



ب



الف

شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز شیمیایی نقاط مختلف فاز ثانویه، الف. فصل مشترک بالا و ب. فصل مشترک پایین.

۴- نتیجه گیری

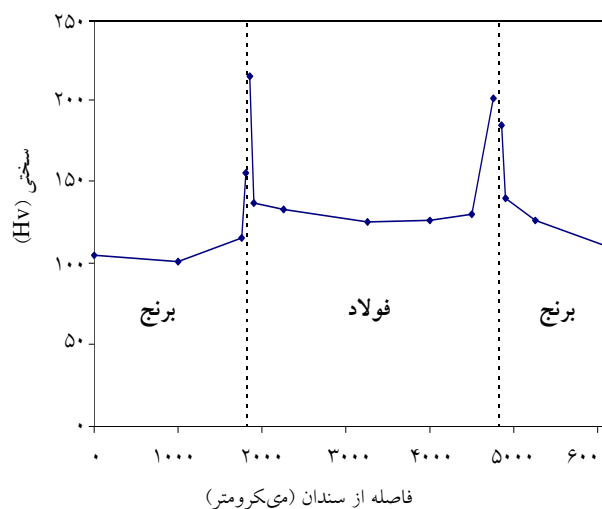
نیز در منطقه اتصال، حاصل شده است.

شکل ۴ پروفیل سختی نمونه ۴ را در مقطع عرضی نشان می دهد. مشاهده می شود که دو مقدار بیشینه در این پروفیل وجود دارد که در فصل مشترک های بالا و پایین قرار گرفته اند. به دو دلیل، حداکثر مقدار سختی در دو منطقه فصل مشترک به سبب ایجاد ترکیب بین فلزی تردی نیست. دلیل اول: مقدار افزایش سختی نسبت به زمینه از مقادیر ۸۰ ویکرز تجاوز نمی کند درحالی که با ایجاد ترکیب بین فلزی، افزایش سختی معمولاً بیش از این مقادیر است. دلیل مهم تر آنکه که مقدار بیشینه سختی در دو فصل مشترک متفاوت است؛ به نحوی که مقدار بیشینه سختی در فصل مشترک بالا بیش از مقدار بیشینه سختی در فصل مشترک پایین است؛ درحالی که مطابق با آنالیز عنصری EDS، فازهای هر دو فصل مشترک یکی است. بنابراین دلیل افزایش سختی در فصل مشترک، موج شوکی و تغییر فرم مکانیکی است که در فصل مشترک بالا بیش از فصل مشترک پایین بوده است.

- در همه نمونه ها، اتصال کامل در هر دو فصل مشترک بالا و پایین به وجود آمده بود.
- فصل مشترک ها، برحسب میزان انرژی ضربه وارده، به صورت صاف یا موجی ایجاد می شوند. با افزایش فاصله توقف (افزایش انرژی ضربه) فصل مشترک از حالت صاف به حالت موجی تبدیل می شود.
- با افزایش فاصله برخورد، در فصل مشترک های بالا و پایین، دامنه و طول موج در فصل مشترک ها، افزایش می یابد.
- چون کسر کمتری از انرژی ضربه به فصل مشترک پایین رسیده است، فصل مشترک های بالا دارای دامنه و طول موج بیشتری نسبت به فصل مشترک های پایین دارند.
- در فصل مشترک های بالا و پایین هیچ گونه ترکیب بین فلزی به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی یافت نمی شود.
- آزمایش های سختی سنجی، وجود دو مقدار بیشینه سختی را در فصل مشترک ها نشان می دهد که ناشی از تغییر فرم مکانیکی و ایجاد موج شوکی، در محل برخورد و در منطقه فصل مشترک ها است.

مراجع

1. Crossland, B., Explosive Welding of Metals and Its Applications, Oxford University Press, ISBN-10: 0198591195 (1982) 1-45.
2. Blazynski, T.Z., Explosive Welding, Forming and Compaction, Springer, ISBN-10: 0853341664 (1983) 150-175.
3. Cowan, G.R. and Holtzman, A.H., "Flow Configuration in Colliding Plate: Explosive Bonding", *Journal of Applied Physics*, Vol. 34 (1963) 928-939.



شکل ۴: پروفیل سختی مقطع عرضی نمونه ۴.

- Explosive Welding Method”, *Materials and Design*, Vol. 29 (2008) 275-278.
8. Kahraman, N., Gulenc, B., “Micro structural and Mechanical Properties of Cu-Ti Plates Bonded through Explosive Welding Process”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169 (2005) 67-71.
 9. Raghukandan, K., “Analysis of the Explosive Cladding of Cu-Low Carbon Steel Plates”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139 (2003) 573-577.
۱۰. زمانی احسان، مطالعه تجربی و تحلیلی جوشکاری انفجاری لوله های هم محور فولاد ضد زنگ و فولاد کربنی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس " ۱۳۸۳.
4. Leedly, K.D. and Stubbins, J.F., “Copper Alloy-Stainless Steel Bonded Laminates for Fusion Reactor Applications:Crack Growth and Fatigue”, *Material Science and Engineering A*, Vol. 297 (2001) 19-25.
 5. Durgutlu, A., Okuyucu, H. and Gulenc, B. “Investigation of Effect of the Stand-Off Distance on Interface Characteristics of Explosively Welded Copper and Stainless Steel”, *Materials and Design*, Vol. 29 (2008) 1480-1484.
 6. Durgutlu, A., Okuyucu, H. and Gulenc, B. “Examination of Copper/Stainless Steel Joints Formed by Explosive Welding”, *Materials and Design*, Vol. 26 (2005) 497-507.
 7. Gulenc, B., “Investigation of Interface Properties and Weldability of Aluminum and Copper Plates by